

Артемов Сергей Робленович – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет гражданской защиты Украины; заведующий кафедрой охраны труда и техногенно-экологической безопасности, ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023; тел.: 067-928-75-59; e-mail: sergey.artemev.1967@mail.ru.

Artem'ev Sergey Roblenovich – Ph.D., Associate Professor, National University of Civil Defense of Ukraine; Head of the Department of Labour Protection and man-caused environmental security, st. Chernyshevskaya, 94, Kharkov, Ukraine, 61023; tel.: 067-928-75-59; e-mail: sergey.artemev.1967@mail.ru.

Шаповрев Валерий Павлович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; завідувач кафедри хімічної техніки та промислової екології, вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002.

Шаповрев Валерий Павлович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; заведующий кафедрой химической техники и промышленной экологии, ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002.

Shaporev Valery Paul – PhD, Professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"; head of the department of chemical engineering and industrial ecology Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002.

УДК 621.039.53

А. И. КОМИР

РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРЫ ЯДЕРНОГО ГРАФИТА МЕТОДАМИ МНОГОТОЧЕЧНОЙ СТАТИСТИКИ

Представлен разработанный алгоритм реконструкции трехмерной структуры ядерного графита на основе металлографических изображений. В качестве модельного материала был использован ядерный графит марки АРВ. Проведен гистограммный и вариограммный анализ приведенной методики и отдельно алгоритма реконструкции двух- и трехмерных структур. Показано точность воспроизведения структуры – 4–5 % отклонения при реконструкции материала трехмерной структуры ядерного графита и 15 % отличие в коллинеарности структуры на расстояниях в половину размера реконструируемой структуры.

Ключевые слова: sGems, многоточечная статистика, 3D реконструкция, ядерный графит.

Наведено розроблений алгоритм реконструкції тривимірної структури ядерного графіту на основі металографічних зображень. У якості модельного матеріалу був використаний ядерний графіт марки АРВ. Наведено гістограмний і вариограммний аналіз наведеної методики і окремо алгоритму реконструкції двох-і тривимірних структур. Показано точність відтворення структури – 4–5 % відхилення при реконструкції матеріалу тривимірної структури ядерного графіту і 15 % відміну в колінеарності структури на відстанях в половину розміру реконструюється структури.

Ключевые слова: sGems, багатоточкова статистика, 3D реконструкция, ядерний графіт.

Presents the developed algorithm of a three-dimensional reconstruction the structure of nuclear graphite based on metallographic images using methods of multipoint statistic. Currently used algorithm SNESIM as method for formation 2D structures. As model material was used nuclear graphite grade ARV with porosity about 20 %. The histogrammic and variogram analysis of the given technique and separately algorithm of reconstruction two – and three-dimensional structures is carried out. It is shown the accuracy of reproduction of structure – 4–5 % the variation in the reconstruction of three-dimensional material structure of nuclear graphite and a 15 % difference in the collinear structure at distances of half the size of the reconstructed structure. Presented algorithm can be based on different methods of reconstruction 2D structure using hard data points and training image and used for reconstruction structure of different materials.

Keywords: sGems, multi-point statistics, 3D reconstruction, nuclear graphite.

Введение. В 1963 Джорж Матерон ввел понятие кригинг (kriging) метод также известный как оптимальный или лучшей несмещенный прогноз (optimal or best linear unbiased prediction) [1], термины лучшее линейное предсказание были известны и ранее в работах Wold Н. в 1938 году [2] и А. Н. Колмогорова [3]. Однако именно Джоржу Матерону удалось формализовать и существенно углубить данную теорию.

Разработка методов оценки проницаемости структуры и количества определенной фазы в исследуемой структуре существенно поддерживалось различными нефте- и газодобывающими и сервисными компаниями, такими как Schlumberger, разработавшими платформу Ocean Software Development Framework [4], к которой в 2013 году был написан плагин TI Factory [5], являющийся одним из немногих реализаций реконструкции формирования трехмерной структуры на основе двумерной структуры методами многоточечной статистики.

Для решения задач определения газо- и гидропроницаемости среды, применялись методы форми-

рования структуры сети связанных пор M.J. Blunt et al. [6]. И метод решетчатых уравнений Больцмана [7], однако для данных методов требуется знание внутренней микроструктуры, в виде абстракции и вокселизованной структуры соответственно.

В последнее двадцать лет развитие статистических методов, направленных на формирование двух- и трехмерной структуры материалов на основе статистических данных, ускорило в связи с увеличением расчетных мощностей.

В последнее время исследования трехмерной структуры, а также моделирование на основе трехмерной структуры ядерного графита начинают набирать популярность. На основе трехмерной структуры образцов были проведены исследования газопроницаемости, в качестве источника данных о структуре использовался рентгеновский микротомограф [8], что дает существенный вклад в последующее развитие и дополнение моделированием газодинамики теории

© А. И. Комир. 2016

окисления при различных температурах. Данный подход сложно заменить любым из известных подходов, поскольку исследования данного типа основываются на структуре материала и развитой внутренней пористости, которая достаточно сложно аппроксимируется с помощью теоретических подходов [9]. И при использовании теоретических аппроксимаций требуется определение аппроксимирующих кривых для каждого материала отдельно, что требует существенных затрат на эксперименты. Также следует учитывать, что плотность ядерного графита может изменяться в пределах 10 % в рамках одной заготовки, что в виду нелинейной зависимости плотности от механических характеристик может внести крайне существенное влияние на отличие в результатах теоретического моделирования прочности и механических свойств материала.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Использование реконструкции трехмерных структур на анализе двумерного изображения было использовано [10–12]. Исследователи использовали двухточечную статистику для реконструкции.

Далее исследователи использовали увеличение разрешения для получения лучших результатов исследований, основываясь на методах двуточечной статистики [13–17].

Использование последовательных двумерных слоев для формирования трехмерной структуры являлись достаточно сложными из-за ограничения ширины среза слоя около 10 мкм [18].

Также использовался для формирования срезов ионный луч [19], позволяющий сделать меньшие расстояния между срезами по сравнению с механическими методами и увеличить разрешение трехмерной структуры.

Наиболее успешным методом является неразрушающая рентгеновская микротомография использованная в работах [20–22] на данный момент данный метод настолько развит, что позволяет получать трехмерные структуры с разрешением около 1 микрона без контрастного вещества и около 50 нм с контрастным веществом [23].

Использование многоточечной статистики в качестве инструмента было использовано [24, 25] для реконструкции структуры пористости в песчаных породах.

В 2005 Н. Okabe и М. J. Blunt [26] был предложен общий подход к реконструкции трехмерного изображения на основе двумерного изображения при помощи многоточечной статистики, он основывался на расчете средней вероятности события в моделируемой точке при учете известных событий в трех перпендикулярных плоскостях, моделируемая точка находится при этом в точке пересечения плоскостей.

Первый коммерческий продукт был разработан в 2009 году Straubhaar и Renard и назван Impala [27].

Однако свободно распространяемого общедоступного алгоритма реконструкции трехмерной структуры материала на основе двумерных изображений на данный момент нет.

Цель и задачи исследования. Целью исследования была разработка алгоритма, позволяющая формировать трехмерную структуру ядерного графита на

основе двумерных металлографических изображений.

Для достижения цели исследования были решены следующие задачи:

- разработка методов формирования трехмерного изображения с минимизацией статистического отклонения от характеристик исходного изображения;
- верификация результатов моделирования с помощью методов вариационного анализа и сравнения гистограмм слоев.

Алгоритм формирования трехмерной структуры. В качестве реализованных методов многоточечной статистики был использован пакет sGems, алгоритм SNESIM. Данная библиотека обладает возможностью преобразования двумерного и трехмерного изображения в статистические данные, которые впоследствии, могут быть использованы программой для реконструкции необходимых двумерных и трехмерных изображений соответственно.

Алгоритм SNESIM (single normal equation simulation) был разработан Strebelle [28]. Принцип алгоритма состоит из следующих основных частей:

1. Формирование поискового дерева на основе событий.
2. Создание произвольного пути обхода всех точек создаваемой структуры.
3. Для каждой точки:
 - a. Сбор данных окрестности точки.
 - b. Расчет вероятности вычисляется из уравнения Байеса.

Формула Байеса:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)},$$

где $P(A)$ – априорная вероятность гипотезы А;

$P(A|B)$ – вероятность гипотезы А при наступлении события В;

$P(B|A)$ – вероятность наступления события В при истинности гипотезы А;

$P(B|A)$ – полная вероятность наступления события В.

Был предложен метод итеративного формирования трехмерной структуры на основе многоточечной статистики двумерного изображения с учетом данных полученных при предыдущих итерациях.

Схематическое представление алгоритма реконструкции трехмерных объектов показано на рис. 1, визуальное представление алгоритма формирования представлено на рис. 2. Рис. 2, а визуализирует шаг формирования первичного изображения на гранях куба, следующие изображения рис. 2, б, в, представляют цикл последовательного формирования слоев находящихся посередине наиболее удаленных сформированных слоев.

Методами оценки промоделированных структур были методы двухточечной статистики, так называемые вариограммы и отклонения от фазовой концентрации исходного изображения.

Метод расчета вариограмм использует следующее выражение:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (z_i - z_j)^2,$$

для $i, j \in D$, где z – значение функции в точке, i и j – пространственные значения.

В литературе принято называть $\gamma(h)$ – полувариограммой, [29, 30].

Вариационный анализ является достаточно общим и широко используемым инструментом анализа изображений и их структурных зависимостей [31, 32].

Используемый алгоритм оценки гистограмм и вариограмм предоставленный К. Mahmud и G. Mariethoz и был использован в статье [32].

В ходе моделирования было использовано исходное изображение, приведенное к размеру пикселя,

соответствующему 2 микрометрам, рис. ИИ. Также в ходе работы программного обеспечения исходные данные преобразуются в градации серого со значениями в диапазоне от 0 до 255. Матрица сбора многоточечной статистики в методе SNESIM была размером 25x25 точек. В качестве исходного изображения был использован металлографический снимок, представленный на рис. 3.

В качестве критериев оценки вариограмм были взяты основные параметры извлекаемые из данных, такие как: самородок, порог, диапазон.

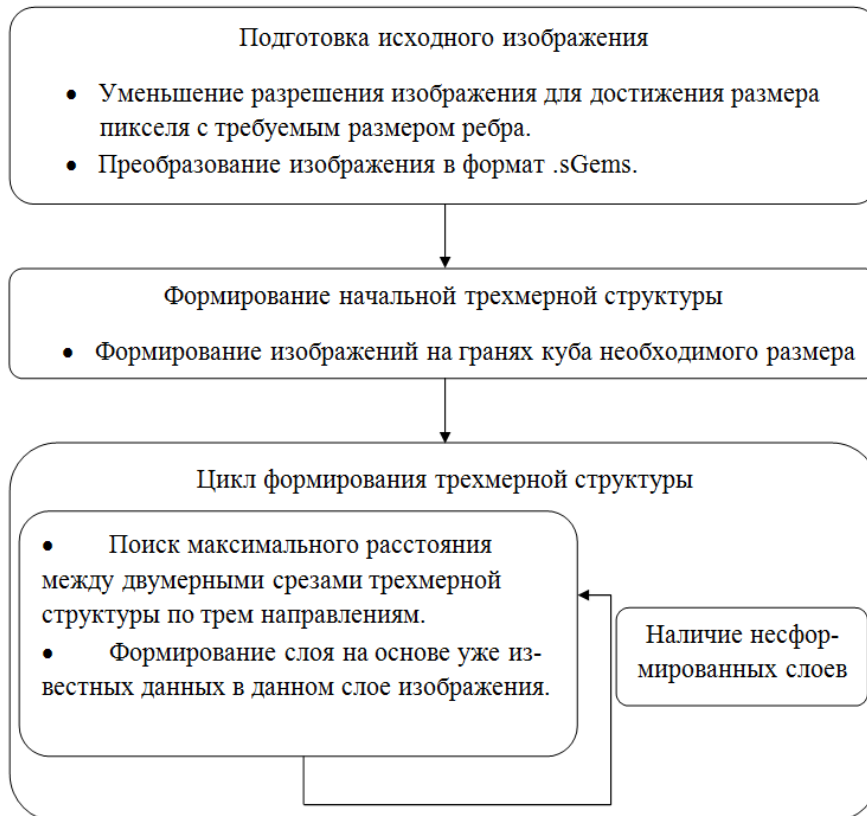


Рис. 1 – Схематическое представление формирования трехмерных объектов на основе двумерных изображений.

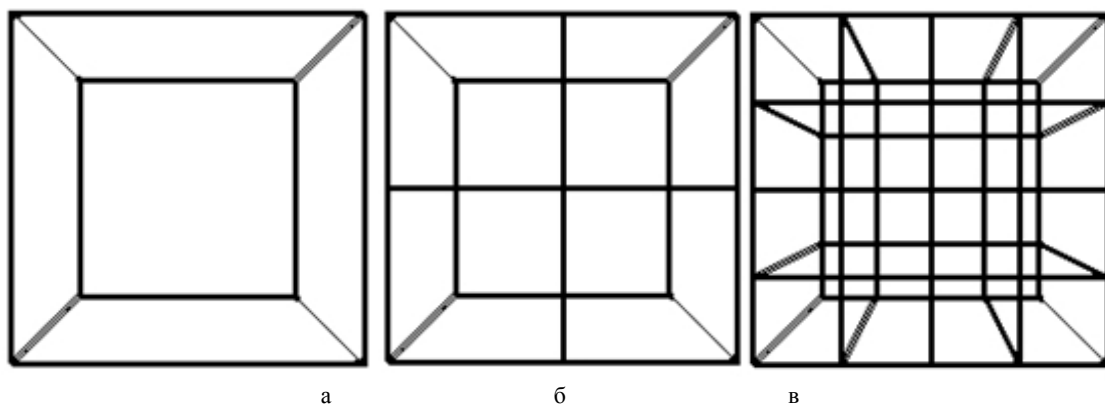


Рис. 2 – Представление последовательного формирования слоев трехмерного изображения в сечении плоскости x-y: а – формирование исходного изображения на краях куба; б, в – формирование внутренних слоев структуры, б – первая итерация, в – вторая итерация.

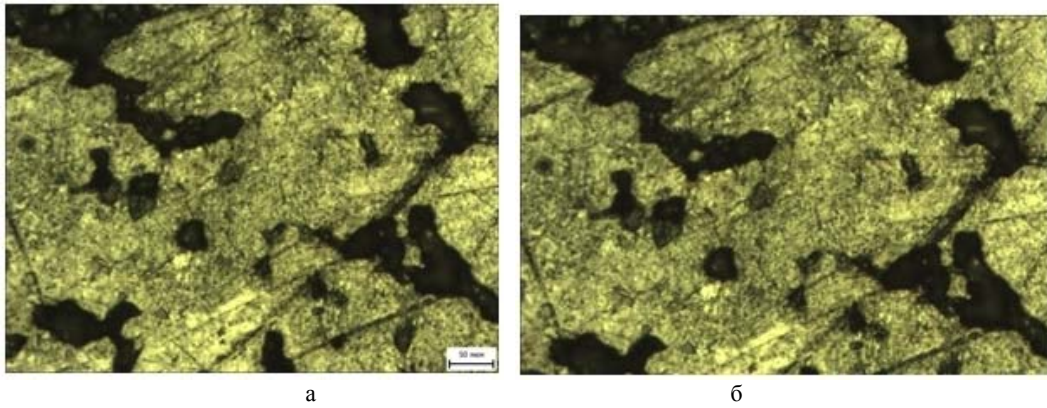


Рис. 3 – Пример использованного изображения, а – с размерной шкалой, б – используемое при расчетах.

Результаты моделирования трехмерной и двумерной структуры ядерного графита марки АРВ

В ходе моделирования было получено 10 образцов 3-х мерной структуры, два примера которых приведены на рис. 4а,4б. Размеры структуры составляли 100x100x100 вокселей.

Используя вариограммный анализ, были проанализированы 150 изображений реконструированных при помощи алгоритма SNESIM и проведен сравнительный анализ с вариограммой и гистограммой исходного изображения, рис. 5, 6.

Используя вариограммный анализ, были получены результаты, представленные в табл. 1.

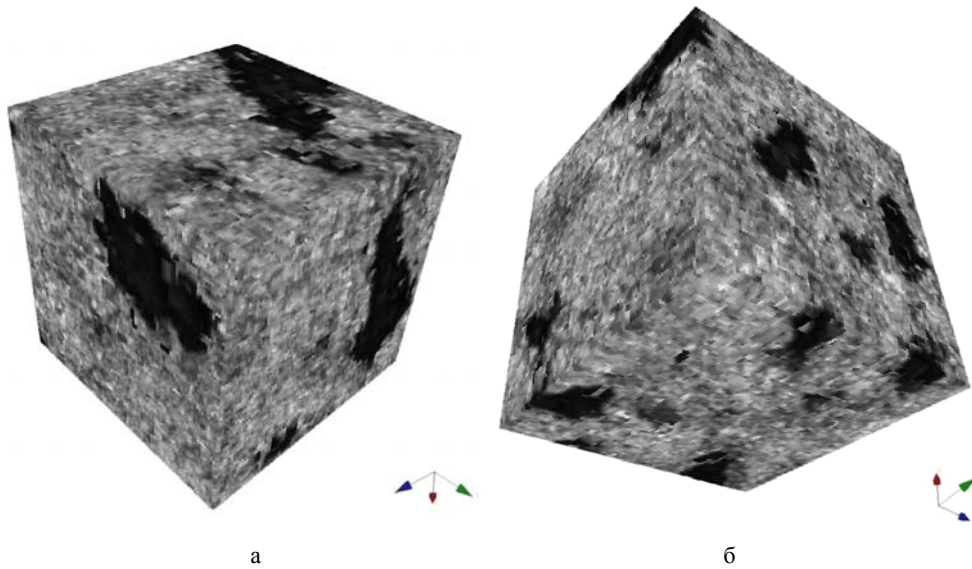


Рис. 4 – Результаты моделирования 3-х мерной структуры: а – вид сверху, б – вид сбоку

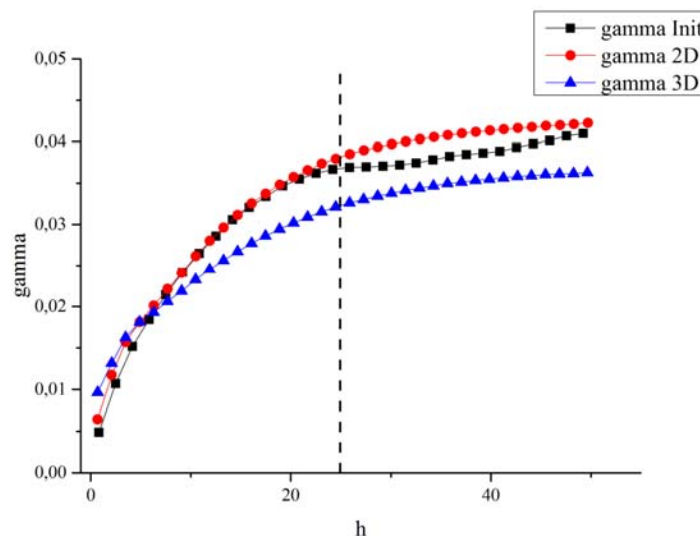


Рис. 5 – Вариограмма исходного изображения, усредненная вариограмма 2-х мерной и 3-х мерной реконструкции

Таблиця 1 – Данніе полученные из вариограммного анализа

Название	Для исходного изображения	Для 2D реконструированной модели	Для 3D реконструированной модели
Самородок (Nugget)	0,00489	0,00646	0,00966
Порог (Sill)	0,04097	0,04226	0,03631

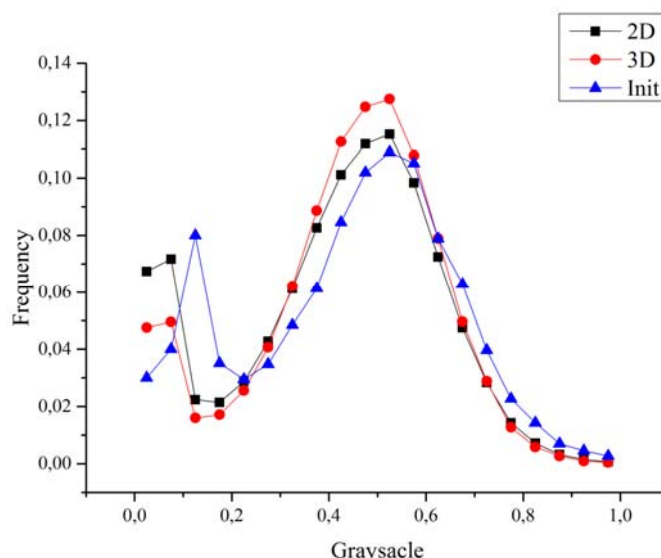


Рис. 6 – Гистограмма исходного изображения, усредненная гистограмма 2-х мерной и 3-х мерной реконструкции

Выводы

1. Был предложен алгоритм моделирования трехмерной структуры на основе двумерных изображений с помощью методов многоточечной статистики.

2. Были проанализированы результаты моделирования с помощью вариограммного и гистограммного анализа: рассчитаны методом особенности трехмерной структуры при реконструкции: наличие неточности в коллинеарности в диапазоне 5–7 вокселей и меньшее значение порога на 15 %. Указано отклонение – 4–5 % материала при аналогичном пороге относительно исходного изображения (20 %).

Список литературы:

- Matheron, G. Principles of Geostatistics [Text] / G. Matheron // Economic Geology, 1963. – Vol. 58. – P. 1246–1266.
- Wold, H. A Study in the Analysis of Stationary Time Series [Text] / H. Wold // Stockholm: Almqvist & Wiksell. – 1938. – P. 295–298.
- Колмогоров, А. Н. “Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей” [Текст] / А. Н. Колмогоров // Изв. АН СССР. Сер. матем., 1941. – С. 3–14.
- Schlumberger, Ocean [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ocean.slb.com/en> – Заголовок с экрана.
- Ephesia. TI Factory [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ocean.slb.com/en/plug-ins/plugindetails?ProductId=PTFF-B1> – Заголовок с экрана.
- Blunt, M. J. Detailed physics, predictive capabilities and macroscopic consequences for pore-network models of multiphase flow [Text] / M. J. Blunt, M. D. Jackson, M. Piri, P. H. Valvatne // Advances in Water Resources. – 2002. – Vol. 25. – P. 1069–1089.
- Chen, S. Lattice Boltzmann method for fluid flows [Text] / S. Chen, G. D. Doolen // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1998. – Vol. 30. – P. 329–364.
- Shi-Pei, Jing. 3D microstructures of nuclear graphite: IG-110, NBG-18 and NG-CT-10 [Text] / Shi-Pei Jing, Can Zhang, Jie Pu, Hong-Yan Jiang, Hui-Hao Xia, Fang Wang, Xu Wang, Jian-Qiang Wang, Chan Jin // Nuclear Science and Techniques. – 2016. – Vol. 27:66. – 8 p.
- Robert, P. W. Penetration depth and transient oxidation of graphite by oxygen and water vapor [Text] / P. W. Robert, D. B. Timothy, I. C. Cristian // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 393. – P. 518–521.
- Quiblier, J. A. A new three-dimensional modeling technique for studying porous-media [Text] / Journal of Colloid and Interface Science. – 1984. – Vol. 98 (1). – P. 84–102.
- Adler, P. M. Flow in simulated porous-media [Text] / P. M. Adler, C. G. Jacquin, J. A. Quiblier // International Journal of Multiphase Flow. – 1990. – Vol. 16 (4). – P. 691–712.
- Adler, P. M. The formation factor of reconstructed porous-media [Text] / P. M. Adler, C. G. Jacquin, J. F. Thovert // Water Resources Research. – 1992. – Vol. 28 (6). – P. 1571–1576.
- Roberts, A. P. Statistical reconstruction of three-dimensional porous media from two-dimensional images [Text] / A. P. Roberts // Physical Review E. – 1997. – Vol. 56 (3). – P. 3203–3212.
- Roberts, A. P. Chord-distribution functions of three-dimensional random media: approximate firstpassage times of Gaussian processes [Text] / A. P. Roberts, S. Torquato // Physical Review E. – 1999. – Vol. 59 (5). – P. 4953–4963.
- Yeong, C. L. Y. Reconstructing random media: II. Three-dimensional media from two-dimensional cuts [Text] / C. L. Y. Yeong, S. Torquato // Physical Review E. – 1998. – Vol. 58 (1). – P. 224–233.
- Manwart, C. Stochastic reconstruction of sandstones [Text] / C. Manwart, S. Torquato, R. Hilfer // Physical Review E. – 2000. – Vol. 62 (1). – P. 893–899.
- Talukdar, M. S. Stochastic reconstruction of particulate media from two-dimensional images [Text] / M. S. Talukdar, O. Torsaeter, M. A. Ioannidis // Journal of Colloid and Interface Science. – 2002. – Vol. 248 (2). – P. 419–428.
- Dullien, F. A. L. Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure [Text] / Academic Press. – 1992. – San Diego. – 574 p.
- Tomutsa, L. Focussed ion beam assisted three-dimensional rock imaging at submicron-scale [Text] / L. Tomutsa, V. Radmilovic // International Symposium of the Society of Core Analysts. – 2003. – SCA2003–47.
- Dunsmuir, J. H. X-ray microtomography. A new tool for the characterization of porous media [Text] / J. H. Dunsmuir, S. R. Ferguson, K. L. D’Amico, J. P. Stokes // SPE 22860. Proc. Annual Technical Conference. – Dallas, Texas, 1991. – P. 423–430.
- Spanne, P. Synchrotron computed microtomography of porous-media-topology and transports [Text] / P. Spanne, J. F. Thovert, C. J. Jacquin, W. B. Lindquist, K. W. Jones, P. M. Adler // Physical Review Letters. – 1994. – Vol. 73 (14). – P. 2001–2004.
- Coles, M. E. Developments in synchrotron X-ray microtomogra-

- phy with applications to flow in porous media [Text] / M. E. Coles, R. D. Hazlett, K. W. Jones et al. // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. – 1998. – Vol. 1 (4). – P. 288–296.
23. ZEISS, X-ray Microscopes [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.zeiss.com/microscopy/en_de/products/x-ray-microscopy/xradia-810-ultra.html – Заголовок с экрана.
 24. Caers, J. Geostatistical reservoir modelling using statistical pattern recognition [Text] / Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2001. – Vol. 29 (3–4). – P. 177–188.
 25. Strebelle, S. Modeling of a deepwater turbidite reservoir conditional to seismic data using principal component analysis and multiple-point geostatistics [Text] / K. Payrazyan, J. Caers // SPE Journal. – 2003. – Vol. 8 (3). – P. 227–235.
 26. Okabe, H. Pore space reconstruction using multiple-point statistics [Text] / H. Okabe, M. J. Blunt // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2005. – Vol. 46. – P. 121–137.
 27. Impala Multiple Point Statistics in JewelSuite™ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.jewelsuite.com/media/Impala%20MPS%20in%20JewelSuite.pdf> – Заголовок с экрана.
 28. Strebelle, S. Sequential simulation drawing structure from training images [Text] / S. Strebelle // Ph.D. dissertation, Stanford University, 2000. – 166 p.
 29. Wackernagel, H. Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications [Text] / H. Wackernagel // Springer Science & Business Media. – 2003. – 388 p.
 30. Webster, R. Geostatistics for Environmental Scientists [Text] / R. Webster, M. A. Oliver // 2nd Edition. – 2007. – 330 p.
 31. Wackernagel, H. Basics in Geostatistics. Geostatistical structure analysis: The variogram [Text] / MINES ParisTech. – 2013. – 37 p.
 32. Mahmud, K. Simulation of Earth textures by conditional image quilting [Text] / K. Mahmud, G. Mariethoz, J. Caers, P. Tahmasebi, A. Baker // Water Resources Research. – 2014. – Vol. 50, I. 4. – P. 3088–3107.
 11. Adler, P. M., Jacquin, C. G., Quiblier, J. A. (1990). Flow in simulated porous-media. International Journal of Multiphase Flow 16 (4), 691–712.
 12. Adler, P. M., Jacquin, C. G., Thovert, J. F. (1992). The formation factor of reconstructed porous-media. Water Resources Research 28 (6), 1571–1576.
 13. Roberts, A. P. (1997). Statistical reconstruction of three-dimensional porous media from two-dimensional images. Physical Review E 56 (3), 3203–3212.
 14. Roberts, A. P., Torquato, S. (1999). Chord-distribution functions of three-dimensional random media: approximate firstpassage times of Gaussian processes. Physical Review E 59 (5), 4953–4963.
 15. Yeong, C. L. Y., Torquato, S. (1998). Reconstructing random media: II. Three-dimensional media from two-dimensional cuts. Physical Review E 58 (1), 224–233.
 16. Manwart, C., Torquato, S., Hilfer, R. (2000). Stochastic reconstruction of sandstones. Physical Review E 62 (1), 893–899.
 17. Talukdar, M. S., Torsaeter, O., Ioannidis, M. A. (2002). Stochastic reconstruction of particulate media from two-dimensional images. Journal of Colloid and Interface Science 248 (2), 419–428.
 18. Dullien, F. A. L. (1992). Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure. Academic Press, San Diego.
 19. Tomutsa, L., Radmilovic, V. (2003). Focussed ion beam assisted three-dimensional rock imaging at submicron-scale. International Symposium of the Society of Core Analysts: SCA2003-47.
 20. Dunsmuir, J. H., Ferguson, S. R., D'Amico, K. L., Stokes, J. P. (1991). X-ray microtomography. A new tool for the characterization of porous media, SPE 22860. Proc. Annual Technical Conference, Dallas, Texas, October 6–9, 423–430.
 21. Spanne, P., et al. (1994). Synchrotron computed microtomography of porous-media-topology and transports. Physical Review Letters 73 (14), 2001–2004.
 22. Coles, M. E., et al. (1998). Developments in synchrotron X-ray microtomography with applications to flow in porous media. SPE Reservoir Evaluation and Engineering 1 (4), 288–296.
 23. ZEISS, X-ray Microscopes, from http://www.zeiss.com/microscopy/en_de/products/x-ray-microscopy/xradia-810-ultra.html
 24. Caers, J. (2001). Geostatistical reservoir modelling using statistical pattern recognition. Journal of Petroleum Science and Engineering, 29 (3–4), 177–188.
 25. Strebelle, S., Payrazyan, K., Caers, J. (2003). Modeling of a deepwater turbidite reservoir conditional to seismic data using principal component analysis and multiple-point geostatistics. SPE Journal, 8 (3), 227–235.
 26. Okabe, H., Blunt, M. J. (2005). Pore space reconstruction using multiple-point statistics. Journal of Petroleum Science and Engineering 46, 121–137.
 27. Impala Multiple Point Statistics in JewelSuite™, from <http://www.jewelsuite.com/media/Impala%20MPS%20in%20JewelSuite.pdf>
 28. Strebelle, S. (2000). Sequential simulation drawing structure from training images: Ph.D. dissertation, Stanford University, 166.
 29. Wackernagel, H. (2003). Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications. Springer Science & Business Media, 388.
 30. Webster, R., Oliver, M. A. (2007). Geostatistics for Environmental Scientists, 2nd Edition, 330.
 31. Wackernagel, H. (2013). Basics in Geostatistics 1 Geostatistical structure analysis: The variogram. MINES ParisTech, 37.
 32. Mahmud, K. Mariethoz, G. Caers, J. Tahmasebi, P. Baker, A. (2014). Simulation of Earth textures by conditional image quilting. Water Resources Research, 50:4, 3088–3107.

Bibliography (transliterated):

1. Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. Economic Geology, 58, 1246–1266.
2. Wold, H. (1938). A Study in the Analysis of Stationary Time Series. Stockholm: Almqvist & Wiksell.
3. Kolmogorov, A. N. (1941). Interpolirovanie i ekstrapolirovanie stacionarnykh sluchaynykh posledovatelnostey, Izv. AN SSSR. Ser. matem., 5:1, 3–14.
4. Schlumberger, Ocean, from <https://www.ocean.slb.com/en>
5. Ephesia. TI Factory, from <https://www.ocean.slb.com/en/plug-ins/plugindetails?ProductId=PTFF-B1>
6. Blunt, M. J., Jackson, M. D., Piri, M., Valvatne, P. H. (2002). Detailed physics, predictive capabilities and macroscopic consequences for pore-network models of multiphase flow. Advances in Water Resources 25 (8–12), 1069–1089.
7. Chen, S., Doolen, G. D. (1998). Lattice Boltzmann method for fluid flows. Annual Review of Fluid Mechanics 30, 329–364.
8. Shi-Pei, Jing, Can, Zhang, Jie, Pu, Hong-Yan, Jiang, Hui-Hao, Xia, Fang, Wang, Xu, Wang, Jian-Qiang, Wang, Chan, Jin. (2016). 3D microstructures of nuclear graphite: IG-110, NBG-18 and NG-CT-10. Nuclear Science and Techniques, 27:66.
9. Wichner, R. P., Burchell, T. D., Contescu, C. I. (2009). Penetration depth and transient oxidation of graphite by oxygen and water vapor. Journal of Nuclear Materials, 393, 518–521.
10. Quiblier, J. A. (1984). A new three-dimensional modeling technique for studying porous-media. Journal of Colloid and Interface Science 98 (1), 84–102.

Поступила (received) 06.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Реконструкція структури ядерного графіту методами багатоточкової статистики/ А. І. Комір// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.18–24. – Бібліогр.: 32 назв. – ISSN 2079-5459.

Реконструкция структуры ядерного графита методами многоточечной статистики/ А. И. Комир// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.18–24. – Бібліогр.: 32 назв. – ISSN 2079-5459.

Reconstruction of nuclear graphite structure by multipoint statistics/ A. I. Komir// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.18–24 – Bibliogr.:32. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Комір Антон Ігорович – аспірант, молодший науковий співробітник, Науково-виробничий комплекс Відновлювані джерела енергії та ресурсозберігаючі технології, Національний науковий центр Харківський фізико-технічний інститут, вул. Академічна, 1, м. Харків, Україна, 61108; e-mail: komir@kipt.kharkov.ua.

Комір Антон Ігорович – аспирант, младший научный сотрудник, Научно-производственный комплекс Возобновляемые источники энергии и ресурсосберегающие технологии, Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, ул. Академическая, 1, м. Харьков, Украина, 61108; e-mail: komir@kipt.kharkov.ua.

Komir Anton – postgraduate student, junior researcher, National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology, Science and Production Establishment Renewable Energy Sources and Sustainable Technologies; Str. Academic, 1, Kharkiv, Ukraine, 61108; e-mail: komir@kipt.kharkov.ua.

УДК 621.793 (045)

В. П. БАБАК, В. В. ЩЕПЕТОВ, С. Д. НЕДАЙБОРЦ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА В ВАКУУМЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ Cr-Si-B, СОДЕРЖАЩИХ ДИСУЛЬФИД МОЛИБДЕНА

Приведены результаты испытаний в условиях вакуума характеристик трения и износа разработанных детонационных покрытий Cr-Si-B, которые дополнительно в качестве антифрикционного компонента содержат добавку твердой смазки в виде диспергированного дисульфида молибдена. Исследуемые детонационные покрытия Cr-Si-B, показали высокие триботехнические характеристики во всем диапазоне испытаний, моделирующих работу узла трения в условиях разреженной атмосферы. При этом, средством регулирования износа и обеспечения высокой антифрикционности покрытий в вакууме является применение в их составе твердосмазочного материала.

Ключевые слова: детонационное покрытие, интенсивность изнашивания, износостойкость, поверхностный слой, структурная приспособляемость, легирование.

Наведено результати випробувань в умовах вакууму характеристик тертя і зносу розроблених детонаційних покриттів Cr-Si-B, які додатково містять антифрикційний компонент добавку твердого мастила у вигляді диспергованого дисульфиду молибдену. Розроблені для практики, досліджувані детонаційні покриття Cr-Si-B, показали високі триботехнічні характеристики у всьому діапазоні випробувань, що моделюють роботу вузла тертя в умовах розрідженої атмосфери. При цьому, засобом регулювання зносу і забезпечення високої антифрикційності покриттів у вакуумі є застосування в їх складі твердо мастильного матеріалу.

Ключові слова: детонаційне покриття, інтенсивність зношування, зносостійкість, поверхневий шар, структурна пристосованість, легування.

This article presents the results of tests under vacuum conditions characteristics of friction and wear, elaborated detonation coating Cr-Si-B, as the anti-friction additive component contains a solid lubricant in dispersed form of molybdenum disulfide. Results of research and characteristic of a friction and intensity of the wear process of the investigated coatings were compared with the wear resistance of detonation coatings of carbide type VK15 and surface layers obtained from the thermal diffusion alloying with boron, vanadium and chromium. It was noted the high wear resistance of coatings containing molybdenum disulfide. With the help of using modern physical methods of analysis was reviewed qualitative and quantitative composition of the surface layers. The work presents the photomicrographs of the friction surfaces, while studying the surface layer, in which processes of activation are under way, used electron-diffraction analysis. It was stressed that solid lubricating surface film except for anti-friction action has anti-wear properties. It had been established that wear-resistant coatings is provided by the creation of the surface of the thin film separating of juvenile object, representing the product anoxic structures based intermetallic phases chemical elements included in the coating composition. Developed for the practices, investigated detonation coating Cr-Si-B, showed high tribological characteristics in the whole range of tests, modeling work of the friction unit in a rarefied atmosphere. In doing so, means to regulate of wear and ensure a high anti-friction coatings in vacuum is application in their structure of the solid material, through the structure influences the level of adaptation of the friction due to the modified surface layers that can block the destruction and shielded the unacceptable setting processes.

Keywords: detonation coating; wear-out rate; wear resistance; surface layer; structural adaptability; alloying.

Введение. Уровень качества и надежность машин и механизмов в значительной степени определяется поверхностной прочностью и износостойкостью используемых материалов. Проблема поверхностной прочности материалов при трении остается одной из наиболее сложных научно-технических областей знаний, так как она теоретическими и прикладными методами изучает вопросы, которые приходится решать в повседневной инженерной практике. Несмотря на достигнутые результаты, ее прикладное решение отстает от современных требований. При этом особенно

важными остаются вопросы обеспечения износостойкости и поверхностной прочности в экстремальных условиях эксплуатации, к которым относятся не только предельно высокие нагрузки и скорости перемещения, но и влияния окружающей среды, в частности, вакуума, где применение традиционных смазок ограничено [1].

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В научной литературе нет достаточного количества обоснованных сведений о влиянии отдельных структурных составляющих композиционных